

지령 경로의 왜곡에 의한 고속가공 경로의 생성에 관한 연구

이철수*, 이제필**

A study on the Tool Path Generation of High-Speed Machining by the Distortion of Original Tool Path

Cheol-Soo Lee*, Je-Phil Lee**

Abstract

Recently many investigations have been studied on the high-speed machining by using machine tools. A CNC machine tool makes some tool path errors caused by software acceleration/deceleration. The faster a cutting feedrate is, the bigger the tool path errors are. Some known methods reduce these kinds of errors, but they make the total cutting time increased.

This paper presents a feed-forward algorithm that can be generated by distorting the original tool path, and reduces the tool path errors and the total cutting time. The algorithm to generate a new tool path is represented as following; 1) calculating each distance of software acceleration/deceleration between two adjacent blocks, 2) estimating the distorted distance which is the adjacent-ratio-constant(K_1 , K_2) multiply the distance of software acceleration/deceleration, 3) generating a 3-degree Bezier curve approximating the distorted tool path, 4) symmetrically transforming the Bezier curve about the intersection point between two blocks, and 5) connecting the transformed Bezier curve with the original tool path.

The algorithm is applied to FANUC OM. The study is to promote the high-precision machining and to reduce the total cutting time.

Keywords : High-Speed Machining (고속가공), Feed-Forward Control (피드포워드 제어), Software Acceleration /Deceleration (소프트웨어 가감속), Distorted Tool Path (왜곡된 공구경로).

1. 서론

* 전남대학교 산업공학과

** 전남대학교 산업공학과 대학원

공작기계 분야에서 NC(Numerical Control)와 CNC(Computerized Numerical Control)의 출현은 생산 현장에서 발생된 많은 문제 요소들을 제거하였으며, 가공 분야에 더 한층 발전할 수 있는 가능성을 확인시켜 주었다. 특히 자동차의 금형과 같은 가공을 위해서는 고속/고정도(High-Speed and High-Precision Machining) 가공은 오래 전부터 많은 요구가 있었지만 여러 가지 요인, 기계의 경량화, 고속 스핀들(약10000 ~ 30000 rev/min), 공구기술 등의 이유로 인하여 실현되지 못하였다. 근래 들어 공작기계는 CNC 기술과 더불어 부과적인 기술들의 발전으로 인하여 고속/고정도에 대한 새로운 발전 가능성을 갖게 되었다^{[1][2][3][4]}.

CNC의 선진국이라 할 수 있는 독일, 일본, 미국 등에서 고속/고정도 제어에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 고속가공을 위한 공구 설계, 기계적인 구조와 전기적 요소에 관한 전반적인 방안을 제시하고^{[5][6]}, CNC의 제어 시스템에서 일반적인 P-제어(P-Control)에 피드포워드 제어(Feedforward Control)를 도입하여 경로오차(Path Errors)를 보정하였다^{[7][8][9][10]}. 피드포워드 제어와 함께 가공형상의 형태에 따라 경험적인 지식을 가미하는 학습 제어(Learning Control)를 통하여 가공 형상에 대한 적응성을 높였다^{[11][12][13]}. 고속가공에 주어진 많은 짧은 가공경로를 형상 정보를 이용하여 선형보간(Linear Interpolation)이 아닌 비선형보간(Nonlinear Interpolation)을 통하여 고속가공을 구현하고 있다^{[14][15]}.

이처럼 고속가공에 대한 많은 연구들은 대부분 서보 제어 루프 안에서의 방법들이다. 본 논문은 피드포워드 제어 분야의 고속/고정도 가공에 대한 새로운 알고리즘을 살펴보고자 한다. 공작기계에서 CNC는 소프트웨어 가감속을 사용함으로써 경로오차가 발생하게 되며, 고속가공 시에 경로오차는 더욱더 현저하게 나타난다. 고가의 컨트롤러 장비(예를 들면, FANUC 15M등)에서는 고속가공에 대한 완벽한 기능을 제공하지만 기존의 대부분의 장비(예를 들면, FANUC 0M등)에서는 고속가공에 대해서는 미미한 기능을 갖고 있다. 고속가공에 대한 완벽한 기능을 보유하고 있다고 하더라도 그 내부의 정확한 알고리즘은 알려져 있지 않다. 따라서 고속가공에 대하여 기존의 미진한 장비를 보완하고 고속가공에 대한 알고리즘의 이해를 도모하는데 본 논문의 목적이 있다.

본 논문에서는 소프트웨어 가감속의 구현 방법을 알아보고 서보 모터의 가감속 시에 소프트웨어 가감속에서 발생하는 문제점(경로오차의 발생)과 이 문제점을 보완하기

위하여 현재 사용 중인 방법들을 살펴본다. 또한 소프트웨어 가감속으로 발생하는 문제점을 해결하는 방법을 제안(경로오차와 절삭가공 시간의 감소)하고 현재 사용하는 방법과 비교하여 제안된 알고리즘의 효용성을 보인다. 고속가공 시에 요구되는 가공정밀도를 만족시킬 수 있는 방법을 제시하여 가공정밀도 문제를 해결하고 절삭가공에 따른 가공시간도 현재의 방법들과 비교하여 볼 때 단축할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. CNC 절삭가공과 가공오차

공작기계의 생산성을 향상시키는 것은 최종 제품을 생산하는 업체에 있어서 뿐만 아니라 공작기계를 생산하는 모든 기계 업체와 CNC를 생산하는 컨트롤러 업체의 공통 과제일 것이다. 원하는 가공정도를 만족하면서 공구의 절삭 이송속도를 2~수십m/min까지 올리는 고속/고정도 가공은 기존 공작기계의 절삭 이송속도(0.1~0.5m/min)와 비교하면 약 20 ~ 50배의 절삭 이송속도 차이를 보여 생산성에 큰 향상을 이룬다^[2].

지금까지 고속가공이 크게 발전하지 못한 것은 마이크로프로세서의 처리속도, 공구기술, 서보 모터의 응답성, 기계의 경량화 그리고 고속 스핀들 등의 문제 때문이었다. 그러나 근래에 들어 공작기계 생산업체는 주축속도, 로터리 테이블의 선회속도, 공구 교환속도, 파렛 교환속도, 준비 작업 속도, 보수 점검 속도 등의 향상을 통하여 고속화를 실현하는데 노력하고 있고^[4], CNC의 생산 업체는 서보 모터의 응답성, 마이크로프로세서의 처리 능력, 하드웨어 설계 기술과 소프트웨어의 개선을 통하여 절삭 가공속도를 향상시킴으로써 고속가공을 실현하려고 한다.

고속가공에 미미한 기능만이 지원되는 기존의 CNC 컨트롤러는 고속가공 시에 가공정도가 떨어지는데 그것은 기계적인 요소도 있지만 가감속 시간에 의해 가공경로가 코너 구간에서 완만하게 변하여 원하는 정도를 만족하지 못하기 때문이다. CNC 컨트롤러의 자동가감속으로 인하여 가공경로가 지령경로로 따라 가지 못하기 때문이다.

2.1 소프트웨어 가감속과 경로오차의 발생

CNC는 급속이송이나 절삭이송에 있어서 서보 모터가 기동할 때나 정지할 때에 부드러운 움직임을 유지하기 위하여 소프트웨어 가감속을 사용하고 있다. 여기에는 직선형 가감속 패턴(Linear Acceleration/deceleration

pattern), 지수형 가감속 패턴(Exponential Acceleration/deceleration pattern), 그리고 파라볼릭형 가감속 패턴(Parabolic Acceleration/deceleration pattern)이 있다. 현재 고속가공을 지원하는 컨트롤러(FANUC 15M)는 가감속에 직선형 가감속만을 사용하기 때문에 본 논문에서는 직선형 가감속 패턴을 사용하여, 수식을 전개하고 시뮬레이션을 하였다. 하지만 FANUC 0M 컨트롤러 장비를 이용하여 실제 가공을 행할 때에는 지수형 가감속 패턴을 사용하였는데, FANUC 0M이 절삭가공에서는 지수형 가감속을 사용하기 때문이다.

직선형 가감속 패턴은 일반적으로 Fig.1과 같은 패턴을 갖으며, FIR(Finite Impulse Response) 필터를 사용하는 경우 명령치로 들어온 속도 프로파일이 FIR 필터와 디지털 컨볼루션(Digital Convolution)에 의하여 직선형 가감속 속도 프로파일이 생성된다^{[17][18][19]}.

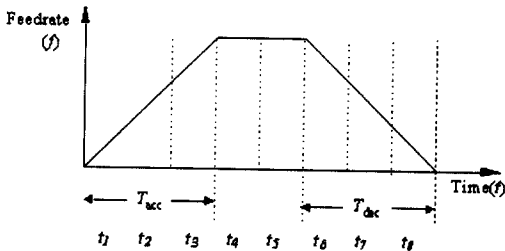


Fig.1 Feedrate profile of linear acceleration/deceleration.

Fig.2에서와 같이 축 X, Y가 직선운동으로 P₁→P₂→P₃→P₄→P₅와 같은 궤적을 추종하도록 가공경로가 지령된다면 자동가감속에서는 P₁의 위치에서 P₅의 위치까지 이송되는 동안 P₂, P₃, P₄를 정확하게 지나지 않게 된다. 가공 품질을 높이기 위하여 자동가감속이 이루어지기 때문에 진행 중인 블록의 감속이 시작되는 지점에서 다음 블록의 가속이 진행되기 때문이다.

Fig.3은 선(先) 블록의 감속과 후(後) 블록의 가속이 겹치는 구간의 가감속 프로파일을 보여주고 있다. P₁, P₂, P₃, P₄, P₅(4블록)를 지나는 동안 각 블록 지령치들의 속도 프로파일이 위쪽 부분과 같이 주어지면, 가감속 필터를 통과한 후의 속도 프로파일은 아래 부분과 같이 생성된다^[16].

자동가감속으로 인하여 발생하는 코너 구간의 경로오차를 감소시키기 위하여 가감속 시간을 단축하는 것은 무

엇보다도 중요한 해결 방안이다. 이 문제를 해결하려고 공작기계를 생산하는 기계 업체는 더 견고하고 경량화된 기계를 만들려는 노력과 동시에 서보 모터의 응답성을 높여 이러한 가공오차의 문제를 다소나마 해결하려고 하였다.

가감속 시간과 함께 경로오차에 직접적인 영향을 미치는 요인은 각 축의 이송속도이다. 선(先) 블록과 후(後) 블록이 있을 때 각 블록의 코너 구간에서의 이송속도를 낮추어 지령한다^[16]. 또 코너 구간에서 허용 오차량(일정거리, 일정시간)을 설정하여 코너 구간에서 자동으로 감속을 유도하는 방법도 있다^[16].

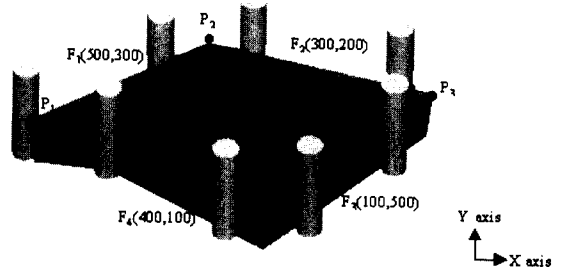
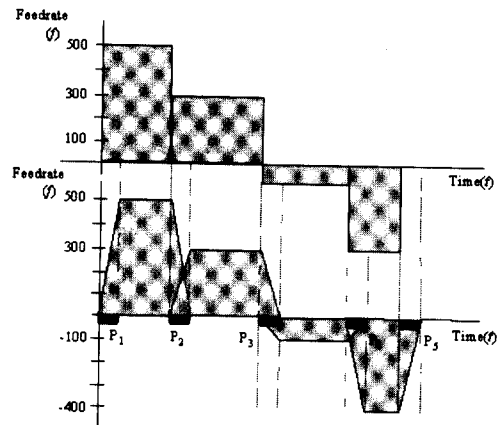
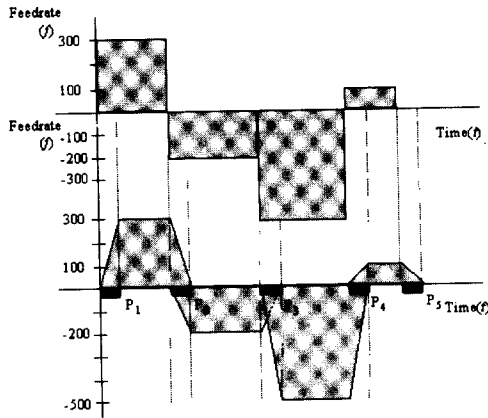


Fig.2 Linear contouring on XY plane of 2-Axis under the automatic acceleration/deceleration (F_i(x, y): x-X axis cutting feedrate, y-Y axis cutting feedrate).



(a) X axis



(b) Y axis

Fig.3 An example of feedrate profile under the automatic acceleration/deceleration.

그러나 가감속 시간을 단축하는 것은 경제적, 기술적인 문제로 인하여 한계를 가지고 있으며, 코너 구간에서 허용 오차량을 설정하는 방법도 이송속도를 조정하는 방법과 마찬가지로 경로오차는 어느 정도 만족할만한 수준으로 줄일 수 있겠지만 코너 구간에서 감속으로 인한 가공시간이 증가하게 된다.

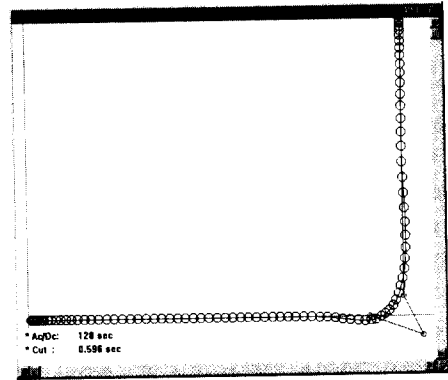
3. 고속가공을 위한 공구경로의 왜곡 방법

3.1 코너 구간에서 가공경로의 왜곡

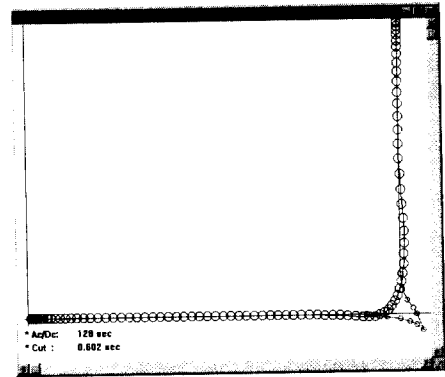
CNC에서 코너 구간에서 나타나는 경로오차의 발생은 가감속 시간과 가감속 패턴 그리고 이송속도에 관한 함수로 예측이 가능한 오차이다^[15]. 경로오차의 양 뿐만 아니라 경로오차로 인하여 이루어지게 될 가공경로도 충분히 예측이 가능하다. 이를 바탕으로 하여 CNC에 실제 이송되는 공구경로가 지령경로에 근접하도록 새로운 공구경로를 생성하여 경로오차가 최소가 되게 한다.

공구경로를 왜곡하는 방법은 Fig.4와 같이 여러 방법들을 시뮬레이션 하였다. Fig.4의 (a)는 코너 구간에서 선 블록의 진행 방향과 후 블록의 반대 방향으로 동시에 이동시켜 새로운 점을 선택하는 것이다. (b)는 자동가감속 시에 생성되는 공구경로를 지령경로를 따라 역으로 보정하는 방법이다. (c)는 선 블록의 진행 방향으로 진행한

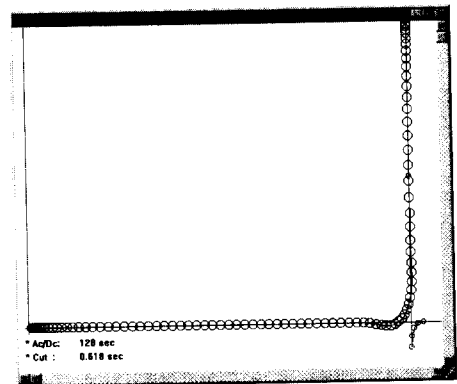
후 초과한 거리에 대해 보정을 하는 방법이다.



(a) opposite extension



(b) reversed compensation



(c) extension according to progressing direction.

Fig.4 Three methods distorting the original tool path(F1:1000mm/min, F2:2000mm/min).

위의 세가지의 경우에 대하여 시뮬레이션 한 결과 Fig.7의 (c)의 경우가 가장 우수한 형태로 나타났다. 왜곡 방법의 특징은 코너 부위에서 선 블록의 진행 방향으로 적당량 만큼 더 진행하며 후 블록도 적당량 만큼 미리 지령하는 방법이다. Fig.7의 (a)와 (b)도 지령치보다 진행 방향으로 더 진행하게 하는 방법이지만 다음 블록의 축에 대한 보정이 (c)보다는 더 빠른 시점에서 이루어지므로 (c)에 비하여 경로 오차량이 커진다. 본 논문에서는 Fig.4 (c)에 대한 자세한 구현 방법과 그 결과에 대하여 살펴 본다.

3.2 왜곡된 가공경로의 생성 절차

Fig.4의 (c)와 같이 선 블록의 진행 방향으로 더 진행하는 방법으로 왜곡된 공구경로를 생성하는 것은 선후 블록의 속도성분이 겹치는 구간(선후 블록의 가감속 구간)을 지연 시킴과 동시에 선후 블록의 감속구간에 근접비율 상수 K_1, K_2 배로 계산되는 거리량 만큼 더 등속운동하게 함으로써 지령된 공구경로에 더 충실히 추종할 수 있도록 하였다. 왜곡된 공구경로의 생성 절차를 보면 Fig.5와 같다.

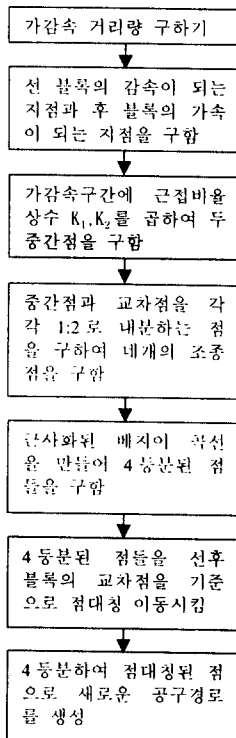


Fig.5 Generation procedure of the distorted tool path.

Fig.6은 가공경로의 왜곡을 나타내기 위하여 축의 움직임을 단순화한 것인데, 두 축(X, Y축)의 절삭이송을 행할 때의 공구의 궤적을 보여주고 있다. 곡선 A는 실제 서보 모터의 구동으로 공구가 이동되는 경로를 나타낸 것이다. P_{12a} 는 블록 1의 감속이 일어나는 지점으로 블록 1의 감속이 계속되어 X축의 지령치인 P_2 점에 도달하는 동안 블록 2의 Y축은 가속하여 등속에 도달한다(P_{23a} 지점). 이와 같이 서로 다른 축의 가감속 구간에서 속도 성분이 교차되는데, 이 속도 성분의 교차를 지연시킴으로써 P_2 점에 더 근접하도록 하여 경로오차를 줄여 가공오차를 보정한다.

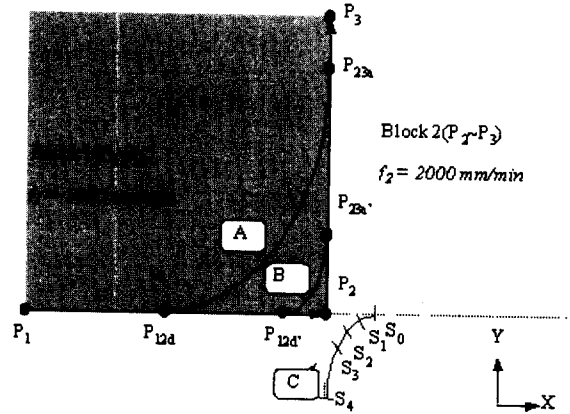


Fig. 6 Distorting the original tool path and generating the new tool path.

3.2.1 선후 블록의 가감속 거리량 구하기

Fig.6과 같이 왜곡된 새로운 지령경로를 생성하기 위하여 먼저 선 블록의 감속 거리량과 후 블록의 가속 거리량을 구한다. 선후 블록의 가감속 거리량은 FIR 필터를 사용할 경우, 각각의 블록에 대한 가감속 시간, 가감속 패턴 그리고 이송속도에 대한 함수이다. 선 블록의 감속 거리량이나 후 블록의 가속 거리량은 결국 같은 방법에 의하여 계산된다.

대부분의 CNC는 한 블록에 있어서 직선형 가감속과 지수형 가감속을 사용할 경우, 가속과 감속의 거리량은 항상 같으므로 지령된 전체 절삭 거리량에서 등속구간에 해당하는 거리량을 제외한 거리량의 1/2이 각각 가속할 때와 감속할 때의 거리량이 된다. Fig.6에서는 감속구간은 P_{12a} 에서 P_2 까지의 거리이며, 가속구간은 P_2 에서 P_{23a} 까

지의 거리이다. 하지만 이송 지령량이 이송속도에 도달하기에 충분하지 못한 경우는 CNC의 기종에 따라 가감속의 거리량을 구하는 방법이 다를 수가 있다. 식 (1), (2)는 FIR필터를 쓴 경우의 가감속 거리량을 구한 것이다.

가감속 거리량
(이송 지령량의 길이 ≥ FIR 필터의 길이)

$$= \sum_{i=0}^{F_i-1} (F * M) = (M - M_i) / 2$$

$$= (M - F_i * (f * m) * (M_i - F_i + 1)) / 2$$

가감속 거리량
(이송 지령량의 길이 < FIR 필터의 길이)

$$= \sum_{i=0}^{M_i-1} (F * M) = (M - M_i) / 2$$

$$= (M - M_i * (f * m) * (F_i - M_i + 1)) / 2$$

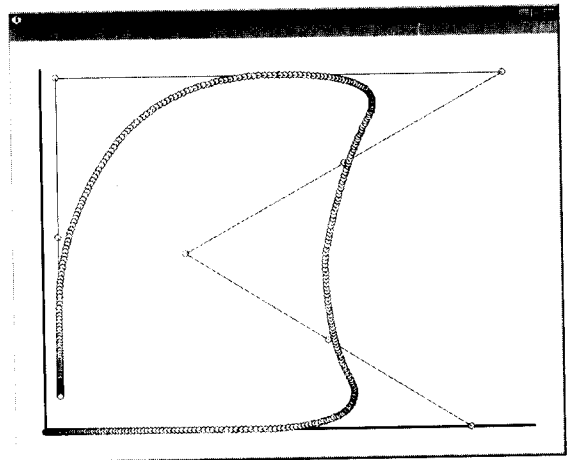
- M : 전체 이송 지령량
- M_i : 가감속 프로파일에서 등속구간의 거리량
- M_i : 이송 지령량의 길이
- F : FIR 필터
- F_i : FIR 필터의 길이
- m : 이송 지령에서 한 블록의 크기
- f : FIR 필터에서 한 블록의 크기

3.2.2 근접비율상수 K₁, K₂와 두 중간점 구하기

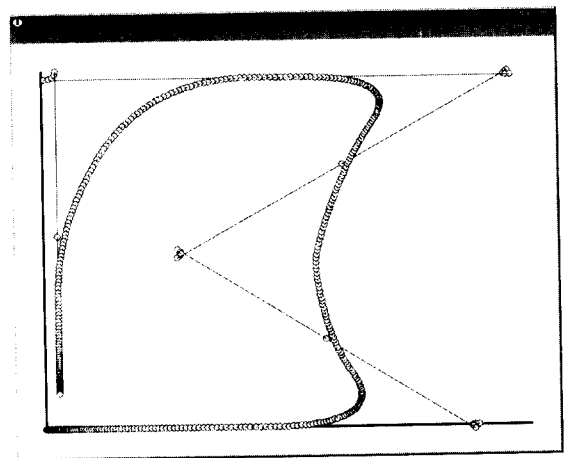
Fig.6에서 자동가감속 시의 공구경로(곡선 A)가 주어져 있을 때, Fig.7과 같은 실험을 통하여 구한 근접비율상수 K₁, K₂ 값을 사용하여 베지어 곡선 B를 만들기 위한 두 중간점 P_{12a}' 점과 P_{23a}' 점을 구한다. K₁, K₂ 값의 범위는 0 ≤ K₁, K₂ ≤ 1이다. 곡선 B는 자동가감속 시에 공구경로인 곡선 A를 K₁, K₂를 적용하여 베지어 곡선으로 근사화한 것이다.

선 블록의 근접비율상수가 K₁이며 후 블록의 근접비율상수가 K₂이므로 선후 블록의 근접비율상수 K₁, K₂의 값에 따라 곡선 A의 형태와는 전혀 다른 왜곡된 공구경로를 만들 수도 있다. 실제로 K₁, K₂의 값을 동일한 상수 값으

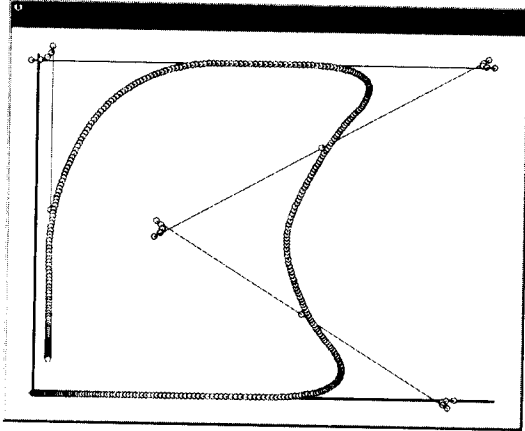
로 하는 것보다는 선후 블록에 각각 다른 상수 값을 설정하는 것이 더 효과적이다. Fig.7은 근접비율상수 K₁, K₂를 결정하는 과정을 시뮬레이션한 것인데, K₁, K₂가 모두 0.1인 (c)의 경우를 보더라도 마지막 블록의 왼쪽부분으로 이상 경로가 발생함을 볼 수 있다. 이것은 K₁, K₂값을 선후 블록에 독립적인 K₁과 K₂로 설정함으로써 쉽게 해결할 수 있다. (d)는 이를 보정한 것인데 선 블록의 K₁은 값을 줄이고 K₂는 값을 더 크게 한 것이다.



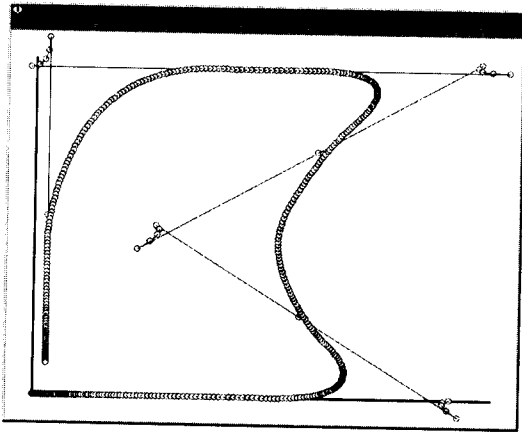
(a) K₁=0.0, K₂=0.0



(b) K₁=0.05, K₂=0.05



(c) $K_1=0.1, K_2=0.1$



(d) $K_1=0.09, K_2=0.2$

Fig.7 Tool path errors according to the adjacent-ratio-constant.

3.2.3 근사화된 베지어 곡선 만들기

앞에서 구한 두 중간점을 베지어 곡선의 시작점과 끝점으로 하는 3차 베지어 곡선을 만든다⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. 이것은 Fig.6에서 볼 때 곡선 B이다. 따라서 근접비율상수 K_1, K_2 가 모두 1.0일지라도 자동가감속할 때 실제 공구경로인 곡선 A와는 완전히 일치하지는 않는다.

베지어 곡선을 만들 때 두 조종점(Control point)은 두 중간점과 교차점이 이루는 직선 벡터를 각각 시작점과 끝점의 접선 벡터로 사용하여 구한다. Fig.8에서 보는 것처럼 앞 단계에서 구한 두 중간점(Q_0, Q_3)과 두 조종점

(Q_1, Q_2)을 가지고 3차 베지어 곡선을 만든다. 두 중간점(Q_0, Q_3)은 가감속 거리에 각각 근접비율상수 K_1, K_2 를 곱하여 구하고, 두 조종점(Q_1, Q_2)은 각각의 점에서 Q_0 와 P_c, Q_3 과 P_c 를 접선 벡터로 하여 1대 2로 내분한 점이다. 4개의 모든 조종점을 구한 후 식 (3)에 의하여 3차 베지어 곡선을 구한다.

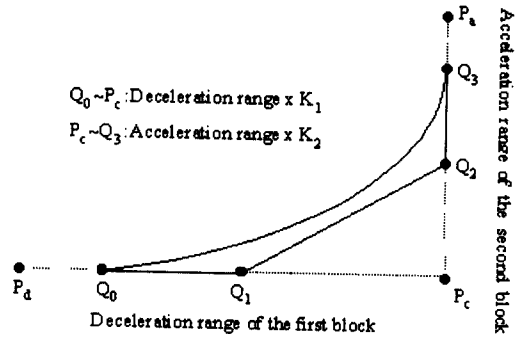


Fig.8 Generating the Bezier curve.

$$\begin{aligned}
 R(u) &= \sum_{i=0}^3 B_i^3(u) Q_i \\
 &= \sum_{i=0}^3 \binom{3}{i} (1-u)^{3-i} u^i Q_i \\
 &= (1-u)^3 Q_0 + 3u(1-u)^2 Q_1 + 3u^2(1-u) Q_2 + u^3 Q_3 \\
 &= (1-u)^3 (P_c - D1_{dec} \times K_1) \\
 &\quad + 3u(1-u)^2 (P_c - D1_{dec} \times K_1 \times 2/3) \\
 &\quad + 3u^2(1-u) (P_c + D2_{acc} \times K_2 \times 2/3) \\
 &\quad + u^3 (P_c + D2_{acc} \times K_2)
 \end{aligned}$$

$R(u)$: 곡선, $B_i^3(u)$: 3차 Bernstein 블렌딩 함수,
 Q_i : i 번째 조종점, u : 매개변수,
 P_c : 선후블럭의 교차점,
 $D1_{dec}$: 감속구간, $D2_{acc}$: 가속구간,
 K_1 : 앞블럭의 근접비율상수, K_2 : 뒷 블럭의 근접비율상수.

식 (3)에서 u 는 곡선을 만들기 위한 매개변수로 0 부터 1사이의 값이다. 따라서 3차 베지어 곡선을 몇개의 적절한 블럭으로 나누는데, 본 논문에서는 4블럭으로 만들기 위하여 u 값이 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0인 경우의

베지어 곡선상의 위치를 구한다. Fig.6에서 볼때 곡선 B의 곡선상의 4등분한 점에 해당하며 결국 이점이 S₀, S₁, S₂, S₃, S₄에 해당하게 된다.

3.2.4 왜곡된 공구경로 생성

Fig.6에서 베지어 곡선(곡선 B)을 선후 블록의 교차점 P2를 기준으로 하여 점대칭 이동시키면 곡선 C를 얻을 수 있다. 곡선 C 상의 점들(S₀, S₁, S₂, S₃, S₄)을 이용하여 새로운 왜곡된 공구경로를 구하면 아래와 같다.

왜곡 전 공구경로 : P₁ → P₂ → P₃

왜곡 후 공구경로 : P₁ → S₀ → S₁ → S₂ → S₃ → S₄ → P₃

생성된 베지어 곡선을 점대칭 이동시켜 지령경로를 변경함으로써 왜곡된 공구경로가 생성되는데, 공구의 이송 지령치로 원하는 공구경로보다 더 지령하게 되므로 공구경로가 원하는 절삭경로를 갖지 않는다. 따라서 왜곡된 경로에 대하여 해당축의 반대 방향의 거리 성분을 다음 블록에서 보정하여 왜곡된 거리 성분을 상쇄시킨다.

Fig.6에서 X축만 보면 P₂에서 S₀까지가 왜곡된 공구경로이며, S₀에서 S₁, S₂, S₃를 거쳐 S₄로 가는 거리량이 왜곡된 공구경로에 대한 보정 성분으로 작용하여 전체적으로는 왜곡 전 지령 공구경로와 같은 지점을 가리키게 된다. Y축의 경우는 블록 1에서는 이송량이 없으나 블록 2에서 이송 지령치가 있으므로 Y축의 가속이 되는 시점을 지연시키기 위하여 블록 2의 Y성분의 반대 성분을 미리 준다. S₀, S₁, S₂, S₃, S₄ 점들의 Y성분 값을 주어 미리 왜곡시키고 이를 블록 2를 지령할 때 왜곡된 거리량을 가산하여 지령한다.

3.3 공구경로 왜곡 방법의 비교 분석

Fig.9는 CNC의 자동가감속과 코너 구간에서의 이송속도를 조정하는 방법, 본 논문에서 제안한 공구경로 왜곡 방법의 가속 프로파일을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 (b) 방법은 (c) 공구 경로를 왜곡하는 방법보다 코너 구간에서 더 많은 시간이 소요되어 가로축의 방향으로 더 길어짐을 알 수 있다. 코너 구간에서 속도를 점차적으로 감소시키는 것은 여러 번의 감속과 가속을 함으로써 그 만큼의 등속구간이 줄어들고 감속시간이 많아져 절삭시간이 길어진다. Fig.9에서 색칠된 부분의 면적은 모두 거리를 나타내는데 (b)의 X축의 경우 시간당 이

송된 거리 양이 완만하게 줄어들고 증가하는 것을 알 수 있다.

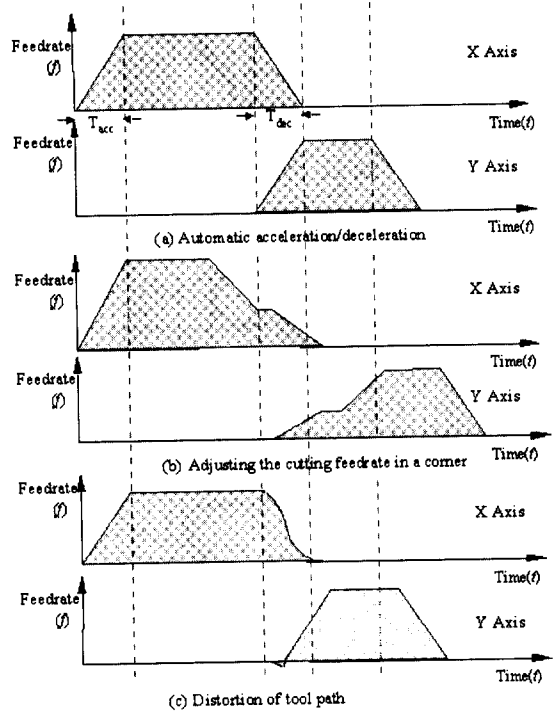


Fig.9 The comparison of three feedrate profiles.

자동가감속을 행한 경우와 비교하여 볼 때, 공구경로 왜곡 방법의 지연시간은 식 (4)와 같다.

공구경로왜곡방법의지연시간 =

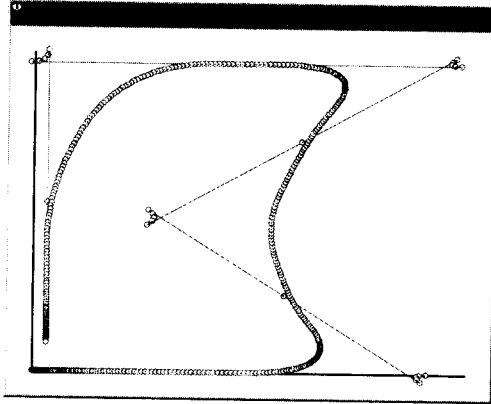
$$(D1_{dec} \times K_1 / F_1) + (D2_{acc} \times / F_2) \times 2$$

D1_{dec} : 감속구간, D2_{acc}: 가속구간,

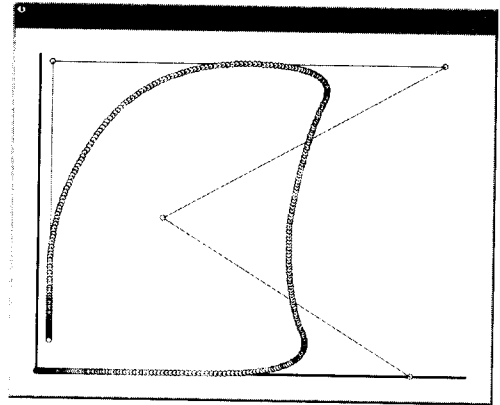
K₁: 앞블럭의근접비율상수, K₂: 뒷블럭의근접비율상수,

F₁: 앞블럭의이송속도, F₂: 뒷블럭의이송속도.

가감속 시간을 256msec로 고정하고 근접비율상수 K₁ 과 K₂를 변경하여 가면서 공구경로의 왜곡되는 것을 FIR 필터를 가속 필터로 사용하여 시뮬레이션하여 보면 Fig.10과 같다.

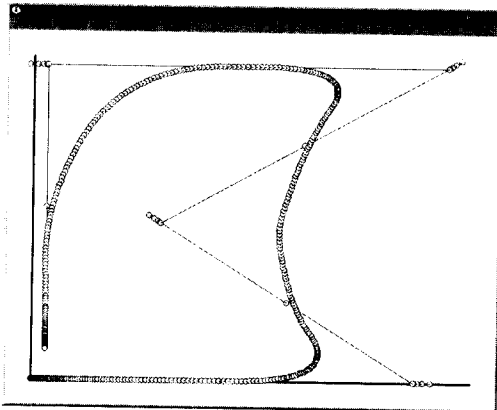


(a) $K1=0.09, K2=0.09$

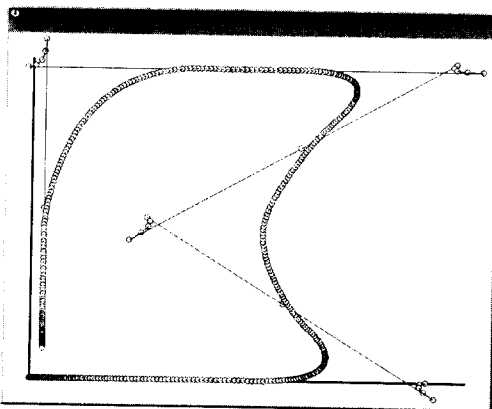


(d) $K1=0.0, K2=0.0$

Fig.10 The Distorted tool path and simulated tool path (acceleration/deceleration time: 256msec).



(b) $K1=0.09, K2=0.0$



(c) $K1=0.09, K2=0.2$

여기서 특이한 것은 공구경로를 왜곡할 때에 선후 블록을 모두 왜곡하지 않고 선 블록만을 왜곡하여 새로운 공구경로를 생성한 (b)이다. 선후 블록 모두를 왜곡하여 왜곡된 공구경로를 생성하면 이것은 원하지 않는 새로운 공구경로의 왜곡을 가져와 가공정밀도 면에서 큰 효과를 얻기 힘들다.

이상 왜곡이 생기는 원인은 찾아보면, 선 블록의 이송속도가 작고 후 블록의 이송속도가 클 때 후 블록에 대한 오차를 보정하더라도 어느 정도의 이상 왜곡이 생긴다. 선 블록의 왜곡된 경로에 대한 이송속도의 지령은 왜곡된 거리량을 감속구간에서 충분히 소화할 수 있을 정도의 값을 지령하여야 하며, 후 블록은 허용 오차량을 고려하여 이를 공구경로 생성하여 후 블록의 왜곡에 반영한다. 후 블록의 K_2 의 값은 곧바로 공구경로의 이상 왜곡을 가져오므로 허용 오차량을 만족시키도록 잘 조절하여야 한다.

4. 공구경로 왜곡 방법의 검증

4.1 2차원 형상의 절삭가공 시험

Fig.11과 같은 가공물의 형상을 FANUC 0M에서 절삭가공 시험을 하였으며, 기계의 체원은 각 축들의 이송거리가 760mm × 430mm × 500mm이며, 스피들이 10~4000RPM을 갖는 기계를 사용하였다. 절삭가공 시험에서는 자동가감속을 할 때와 절삭이송 시에 공구경로를 왜곡시키는 두가지 방법을 비교하여 시행하였다. 가감

속 시간을 128, 256 msec에서 각각 독립적으로 시행하였으며, 가공물의 치수와 가공조건은 Fig.11과 같다.

앞에서 코너 구간에서 이송속도를 조정하는 방법과 허용 오차량을 설정하는 방법을 설명하였는데, 허용 오차량을 설정하는 방법은 CNC 컨트롤러에서 처리하게 하기 위하여 단지 상수값을 CNC 컨트롤러에 설정하는 것이므로 절삭 시험에서는 제외하였고, 코너 구간에서 이송속도를 조정하는 경우도 자동가감속의 경우와 비교할 때 가감속을 수행하는 횟수만을 늘리는 것이므로 제외하였다.

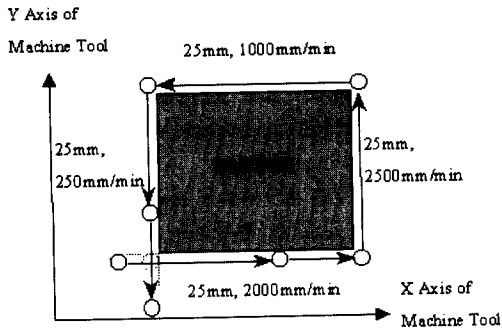


Fig.11 A workpiece and a tool path of cutting machining.

Fig.12, Fig.13의 (a) 그림은 모두 자동가감속을 행할 때의 실제 절삭가공을 한 가공물 형상과 절삭가공 시의 서보 모터의 엔코더 값을 샘플링하여 공구경로를 표시한 것이다. (b)는 근접비율상수를 선후 블록에 같은 값으로 적용한 경우이고, (c)는 근접비율상수를 선후 블록에 다르게 적용한 것이다. 각각의 그림에서 우측의 공구경로를 표시하여 놓은 것은 FANUC사에서 제공하는 장비를 이용하여 절삭가공을 할 때의 서보 모터의 엔코더 값을 샘플링하여 그래프로 만들어 주는 것을 삽입한 것이다. 샘플링 장비의 샘플링 주기는 1 msec이며, 10000개의 데이터를 수집하였다.

Fig.12 가감속 시간이 128msec인 경우의 (a)와 같이 실제 가공된 실물을 보면, 자동가감속에서 절삭가공을 행한 경우와 (b)와 (c)처럼 공구경로를 왜곡하여 절삭가공을 한 경우를 비교할 때 차이를 발견할 수 있다. 가공물의 형상에서 이송속도가 큰 부분은 가공오차를 쉽게 알 수 있는데, (a)의 오른쪽 아래쪽의 직각부분을 (b), (c)와 비교하였을 때 육안으로 큰 차이를 느낄 수 있다. 이런 차

이는 두 축의 엔코더 값을 샘플링한 그림을 보면 더 쉽게 확인할 수 있다. 서보 모터의 엔코더 값을 직접 샘플링하여 그린 그래프는 이러한 차이를 확실하게 보여 준다. Fig.12와 Fig.13을 비교하면 가감속 시간이 커짐에 따라 자동가감속으로 발생하는 오차가 현저히 커지며, 공구경로를 보정하는 양도 커짐을 알 수 있다.

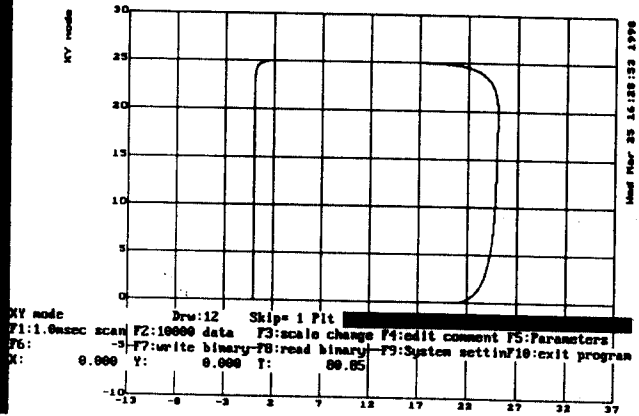
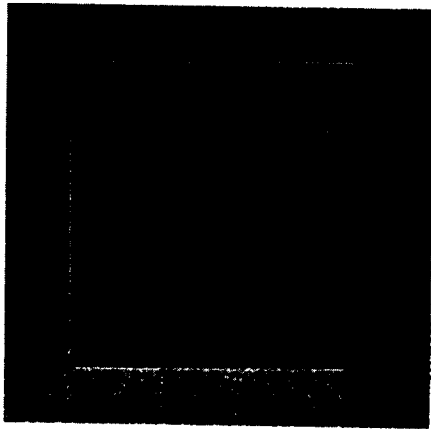
실제 절삭가공을 할 때 이송시간 면에서는 공구경로 왜곡 방법이 약간 더 절삭가공 시간을 소요하지만 가공오차 면에서는 자동가감속보다는 훨씬 좋은 가공정밀도를 보이고 있다. 특히 상이한 근접비율상수 K_1 , K_2 를 적용한 경우는 상대적으로 적은 오차를 보이고 있다. 공구경로 왜곡 방법은 가공오차 면에서 자동가감속 시보다 많은 향상을 이루었으며 이송시간도 그리 크지 않음을 알 수 있다.

Fig.12와 Fig.13에서 근접비율상수 K_1 , K_2 가 Fig.10에서 구한 값과 다른 이유는 FANUC OM에서 소프트웨어 가감속을 행할 때 FIR 필터를 쓰지 않기 때문이다. Fig.7은 FIR 필터가 짧은 블록일 때에 단점이 있으므로 팔목할만한 개선이 되지 않지만 FANUC-OM은 FIR필터가 가지고 있는 단점이 없으므로 큰 개선을 이루었다.

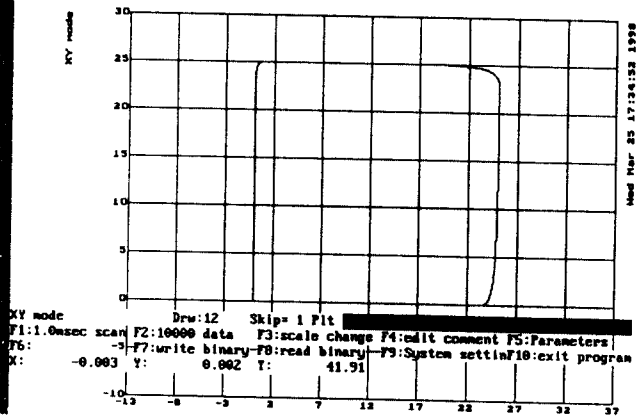
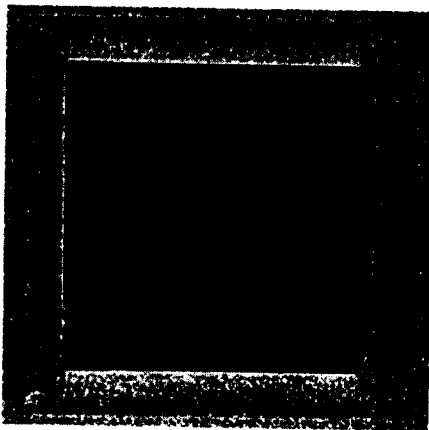
Table 1의 가공시간은 형상만은 가공한 시간이며, 가공오차는 선후 블록의 교차점에서의 최단 거리를 비율로 나타낸 것이다.

Table 1가공시간과 가공오차의 비교.

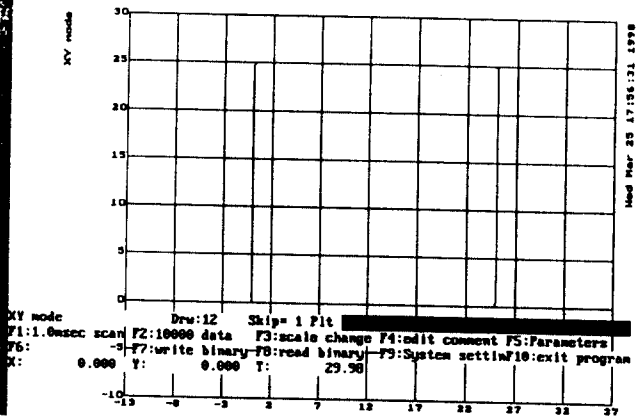
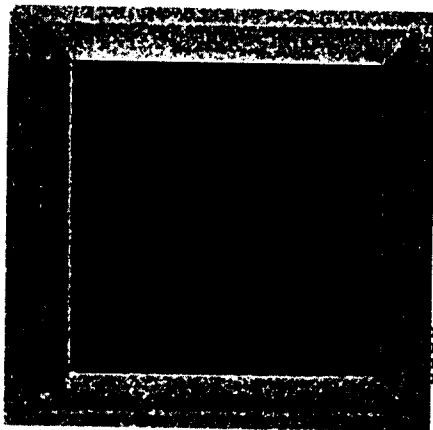
항 목		가공시간 (sec.)	가공오차
가감속 시간 (128 msec.)	자동가감속	8.978	1.00
	$K_1=0.55$, $K_2=0.55$	9.170	0.42
	$K_1=0.83$, $K_2=0.05$	9.362	0.04
가감속 시간 (256 msec.)	자동가감속	9.106	1.00
	$K_1=0.55$, $K_2=0.55$	9.360	0.39
	$K_1=0.83$, $K_2=0.05$	9.513	0.03



(a) Automatic acceleration/deceleration

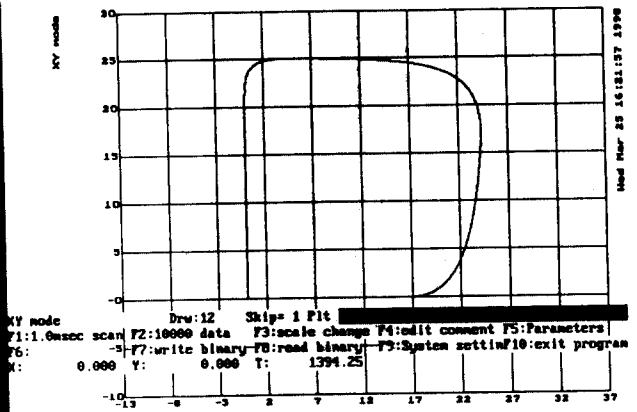
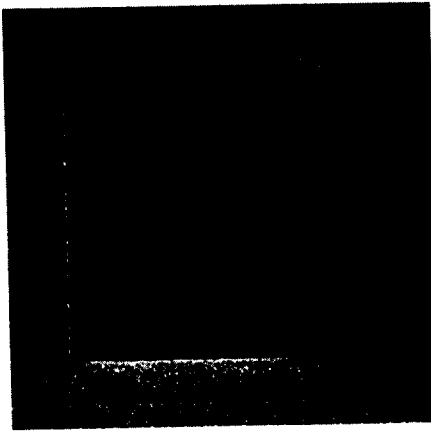


(b) $K_1=0.55, k_2=0.55$

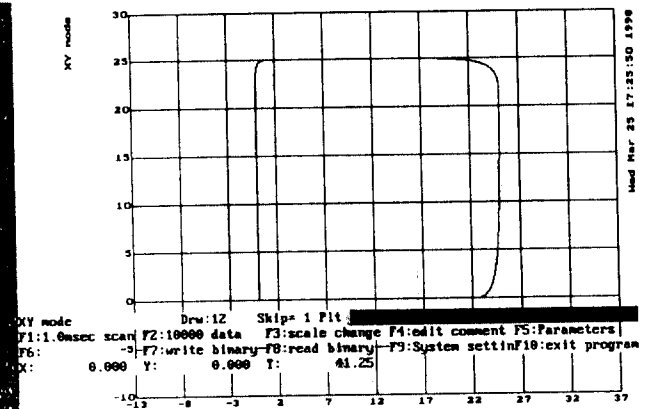
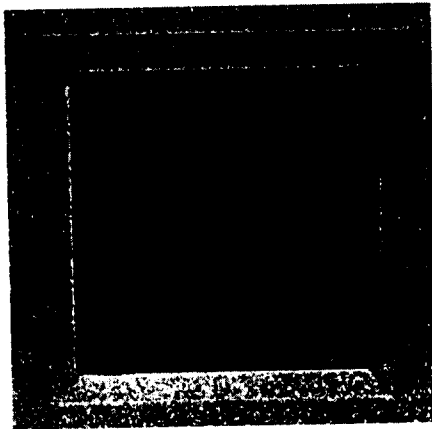


(c) $K_1=0.83, k_2=0.05$

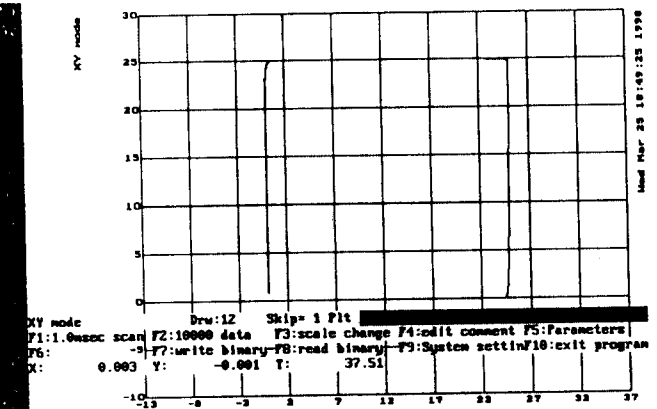
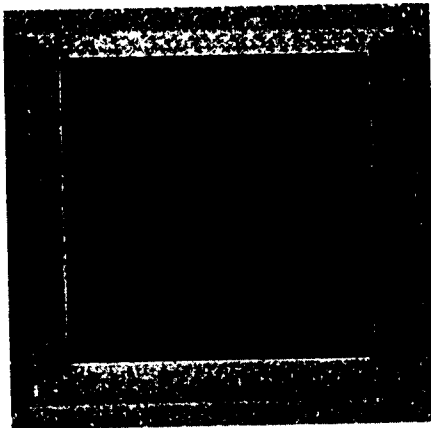
Fig.16 A machined workpiece and a tool path(acceleration/deceleration time : 128msec).



(a) Automatic acceleration/deceleration



(b) $K_1=0.55, k_2=0.55$



(c) $K_1=0.83, k_2=0.05$

Fig.17 A machined workpiece and a tool path(acceleration/deceleration time : 256msec).

5. 결 론

공작기계에서는 앞에서 언급한 제반 기술의 발전으로 인하여 고속가공에 대한 많은 요구를 수용할 수 있는 환경이 갖추어 지게 되었다. 따라서 본 연구에서는 고속가공을 구현함에 있어서 필요한 소프트웨어 알고리즘 중의 하나인 피드포워드 개념의 다음과 같은 알고리즘을 제시하였다.

- 1) 선후 블록의 소프트웨어 가감속 거리량을 각각 구한다.
- 2) 근접비율상수(K_1, K_2)에 각 블록의 가감속 거리량을 곱하여 왜곡할 거리량을 구한다.
- 3) 왜곡할 거리량으로 구한 두개의 중간점과 두개의 내분점을 조종점으로 하여 3차 Bezier곡선을 생성한다.
- 4) Bezier곡선 상의 4등분된 점을 선후 블록의 교차점을 기준으로 대칭 이동시킨다.
- 5) Bezier 곡선으로 근사화하여 대칭된 4개의 점과 선후 블록으로 새로운 가공경로를 생성한다.

제안된 알고리즘은 가공경로만 주어지면 기계의 가감속 시간을 고려하여 간단하게 새로운 가공경로를 생성하였다. 새로 생성된 왜곡된 가공경로는 코너 구간에서 가공 정밀도를 높이기 위하여 CNC(예를 들면, FANUC 0M)에서 사용되고 있는 방법들과 비교하여 절삭 이송시간을 단축하여 가공 생산성을 향상시켰고, 가공 정밀도 면에서도 만족할 만한 결과를 얻었다.

이 알고리즘은 가공경로를 왜곡하는 방법이므로 CAM 시스템에서 가공경로를 생성할 때 적용하여 왜곡된 경로를 생성할 수도 있으며, CNC의 내부에서도 이 알고리즘을 이용하여 가공경로를 새롭게 생성할 수 있다. 또한, 고속가공을 위한 새로운 관점의 알고리즘을 제시함으로써 현재 고속가공 기능을 내장하고 있는 CNC 컨트롤러(예를 들면, FANUC 15M등)의 내부 알고리즘에 대하여 접근할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 機械技術편집부, "機械技術", 機械技術出版部, January 1993, p.74~77.
2. 吉田 嘉太郎, "NC工作機械(머시닝센터)의 高機能化", 95 NC 공작기계 기술세미나, 1995.
3. 梁民陽, "고속가공을 위한 절삭공구의 최적화", 대한

- 기계학회논문집, Vol.11, No.4, 1988, pp.1290~1295.
4. N. Narutaki, Y. Yamane, "Cutting Performance and Wear Characteristics of an Alumina-Zirconia Ceramic Tool in high-Speed Face Milling", CIRP Vol.40/1/1991, pp.49~52.
5. R. Komanduri, J.McGee, R.A.Thomson, "On a Methodology for Establishing the Machine Tool System Requirements for High-Speed Machining/High-Throughput Machining", ASME Vol.107, November, 1985, pp.316~324.
6. H. Schulz, T. Moriwaki, "High Speed Machining", CIRP Vol.41/2/1992, pp.637~643.
7. G.Pritschow, W.Philipp, "Research on the Efficiency of Feedforward Controllers in M Direct Drives", CIRP Vol. 41/1/1992, pp.411~415.
8. Y.Koren, C.C.Lo, "Advanced Controls for Feed Drives", CIRP Vol.41/2/1992, pp.689~698.
9. D.Dumur, P.Boucher, "New Predictive Solutions to Very High Speed Machining", CIRP Vol.43/1/1994, pp.363~366.
10. D.Dumur, P.Bourcher, "Constrained Predictive Control for Motor Drives", CIRP Vol.45/1/1996, pp.355~358.
11. H.Uchida, M.Sogabe, H.Kougami, "High-speed, High-precision servo system", RAPID PRODUCT DEVELOPMENT, August 1997, pp.303~312.
12. Mamoru Mitsubishi, Takaai Nagao, "An Open Architecture CNC CAD-CAM Machining System with Sata-Base Sharing and Mutual Information Feedback", CIRP Vol.46/1/1997, pp.269~274.
13. C.N.Chu, S.Y.Kim, J.M.Lee, "Feed-Rate Optimization of Ball end Milling Considering Local Shape Features", CIRP Vol.46/1/1997, pp.433~436.
14. R.Stadelmann, P.Gygax, "Computation of Nominal Path Values to Generate Various Spatial Curves for Machine Tools", CIRP Vol.38/1/1989, pp.373~376.
15. 류제국, "선박용 CNC의 샘플링 보간법을 적용한 스피라인 보간기", 조선대학교 석사학위 논문, 1995.

16. FANUC, "FANUC Series 15-MA Operation's manual", FANUC, 1991, p.80~94.
17. D.I. Kim, J.I. Song and S.K. Kim, "Software Acceleration/Deceleration Methods for Industrial Robots and CNC Machine Tools", 電氣學會 論文誌 41卷 5號, 1992, pp.562~572.
18. D.I. Kim, J.I. Song, Y.G. Lim, and S. Kim, Software Linear and Exponential Acceleration/Deceleration Methods for Industrial Robots and CNC Machine Tools, KACC' 91, Seoul, Korea, 1991, pp. 1904~1909.
19. D.I. Kim, J.I. Song, and S. Kim, Digital Signal Processor System for CNC Systems, IECON' 91, Kobe, Japan, 1991, pp. 1861~1866.
20. Jack E.Zecher, Computer Graphics for CAD/CAM Systems, Maecel Dekker, Inc., 1994.
21. Vera B.Anand, Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers, John Wiley & Sons.inc., 1993.